

662.66.001.4 = 60

611 - 53

carbones pobres

estado de los estudios experimentales sobre la llama

A. FOLLIO
Doctor Ingeniero

0.—INTRODUCCION

El año pasado les hice un resumen, al exponerles mi tesis sobre el horno de cemento, las condiciones de la transmisión de calor, esencialmente en la zona intermedia, donde se efectúan el precalentamiento y la descarbonatación.

He hablado muy poco de la transmisión de calor en la zona de la llama, porque las condiciones que reinan en esta zona hacen absolutamente imposible su estudio experimental. No se puede desatender, sin embargo, la transmisión, por dos razones:

1.º) Allí se intercambia entre el fluido calefactor y la materia una parte importante de la energía puesta en juego en el horno.

2.º) Allí se producen fenómenos físico-químicos de fusión, los cuales traen consigo la formación de costra y de anillos que tienen una influencia económica considerable sobre la marcha de la fábrica.

Debido a esto es por lo que nos hemos interesado tanto en los estudios que se han hecho sobre el plan general de las llamas del tipo de las que se utilizan en la industria del cemento, es decir, de las llamas de difusión. Desde 1949, hemos participado, particularmente, en los trabajos emprendidos por franceses, ingleses y holandeses en Ijmuiden, cerca de Amsterdam, en Holanda.

Allí en un horno a escala semi-industrial se han llevado a cabo estudios muy serios sobre las llamas de difusión obtenidas con combustibles líquidos, sólidos y gaseosos. Estas experiencias siguen en curso. Son excesivamente difíciles los resultados no son todavía más que fragmentarios. Pero a

nuestro parecer, es el único camino posible para llegar a unos resultados utilizables en la industria.

Aunque la mayor parte de los ensayos efectuados hasta ahora han sido realizados con una llama de mazut y de gas, me limitaré a exponer los obtenidos últimamente con una llama de carbón pulverizado, puesto que estas reuniones están bajo el título de la utilización de los combustibles pobres.

Nuestra charla seguirá las etapas siguientes:

1.º) Hablaremos primeramente de las concepciones teóricas más sencillas sobre el desprendimiento de energía por un combustible pulverizado.

2.º) Veremos que esta forma de concebir la llama es muy sumaria. Nos conducirá a estudiar las condiciones aerodinámicas de mezcla.

3.º) Entonces nos daremos cuenta de que la llama tomada en sí por sus características, esencialmente de radiación, no puede dar cuenta de las transmisiones efectivas de calor del fluido radiando sobre la carga y señalaremos en qué sentido deberán dirigirse de ahora en adelante las investigaciones para dar cuenta de los fenómenos realmente observados.

4.º) Terminaremos nuestra charla con unas consideraciones que no tienen ninguna relación con el desarrollo propiamente dicho de la llama, pero que atraen la atención sobre la importancia de la presencia de polvo, en los gases quemados que suceden a la llama, en relación con el rendimiento del horno de cemento; el aumento del coeficiente de absorción de la masa

gaseosa más allá de un cierto valor lleva consigo una baja de la transmisión de calor, y por lo tanto, de la producción del horno.

1. DATOS TEORICOS SOBRE LA TRANSMISION DE CALOR DE UNA LLAMA

1.1. Nociones globales elementales

Para caracterizar una llama, se dispone inmediatamente:

1.º) De la energía introducida o latente (energía química del combustible); o sensible (precalentamiento del combustible y del carburante), relacionada a un peso de combustible o de humos.

2.º) De la longitud, del diámetro y, por lo tanto, del volumen correspondiente a un cierto consumo horario, por ejemplo, de combustible.

Resulta de ello:

Primeramente: una consideración independiente del consumo.

a) *La temperatura teórica:* dividiendo la energía introducida por el peso de los humos —suponiendo que aire y combustible estén mezclados estequiométricamente—. Pero debido a las disociaciones y al exceso de aire se ve uno inducido a definir:

b) *La temperatura teórica efectiva.*

Pero estas dos definiciones suponen que la llama es isoterma y adiabática.

Luego: una consideración ligada al consumo, que es:

c) *El tanto por ciento de combustión:* dividiendo la energía introducida en el horno en la unidad de tiempo por el volumen de la llama.

Estas características son puramente formales. No implican ningún conocimiento, ni del mecanismo de la combustión, ni del de la transmisión de calor, y no son ningún auxiliar en un estudio de las llamas.

Todo esto, introducido en unas ecuaciones que tienen en cuenta que la radiación es el modo principal de transmisión de calor, como más adelante se verá, explica ciertos fenómenos, pero a este respecto no dan más que lo que la intuición directa puede aportar cualitativamente.

1.2. Determinación de la llama

Para determinar lo que pasa realmente en una llama, se puede ensayar partiendo del estudio del caso voluntariamente simplificado.

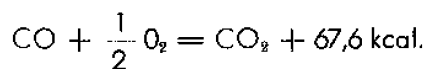
Así es como desde hace mucho tiempo los investigadores han atacado el problema, empezando por estudiar la combustión de esferas de carbono puro en las condiciones muy sencillas de la salida, pero que se van complicando paulatinamente para acercarse a las llamas reales.

A este respecto, la comunicación del profesor E. Wicke, en el último Congreso de la combustión de los combustibles sólidos y pulverizados que ha tenido lugar el pasado otoño en París, ha aportado una contribución muy interesante para la *cinética de la combustión del carbono grafitico*. Para él, las condiciones de cinética son tan importantes para la combustión del carbón como las condiciones termodinámicas (se trata, claro está, de cinética química y no mecánica, aunque los desplazamientos de los granos de carbono en el espacio sean importantes no solamente debido a los fenómenos aerodinámicos, sino a los fenómenos de coquete).

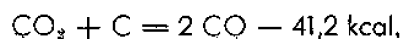
La termodinámica sola no es suficiente para comprender completamente los fenómenos que tienen lugar durante la combustión del carbón. Solamente indica el sentido en el que una reacción podría tener lugar.

No es posible decir termodinámicamente si la reacción tiene lugar efectivamente, con qué velocidad se desarrolla y si alcanza su estado de equilibrio en el tiempo disponible. Esto depende mucho más, de una manera determinante, de los factores cinéticos mencionados.

La incertidumbre sobre el conocimiento y sobre la evaluación de estos factores está ocasionada por la complejidad de las condiciones cinéticas. Al primer ataque del oxígeno sobre el carbono siguen las reacciones de la combustión secundaria del CO:



Y de la reducción del CO₂ según Baoudouard:



El profesor Wicke ha expuesto los resultados obtenidos en el estudio del primer ataque del oxígeno y de las reacciones secundarias.

Muestran cómo, ya, sobre este caso simplificado, el estudio de los fenómenos es complejo y difícil; de hecho, con un combustible real, las velocidades de todas estas reacciones están influenciadas, en gran parte, por los contenidos de materias volátiles y de cenizas del combustible sólido; se ven frecuentemente aceleradas catalíticamente, pero eventualmente también se ven retardadas.

Es por lo que, temiendo el recorrido que queda por hacer hasta llegar al estudio de una llama real, otros investigadores han pensado en estudiar la llama siguiendo con interés, no el destino de una partícula de carbono, sino el trayecto de los conjuntos dinámicos formados por las partículas de carbono tomadas en grupo, las olas de oxígeno, de CO_2 , de CO ...

Pero antes de llegar a los resultados obtenidos por los investigadores que han seguido este camino, y que se expondrán en la segunda parte, vamos a ver como el calor engendrado por estos mecanismos en el seno de la llama se transmite por esta misma llama.

1.3. Esquema teórico de la transmisión

En un horno el transporte de calor de la llama hacia las paredes refractarias o hacia la carga puede realizarse por dos procesos muy diferentes: la convección y la radiación térmica. En los hornos de pequeñas dimensiones en la escala de laboratorio, esta transmisión se efectúa poco más o menos totalmente por convección, sobre todo si se arregla uno para realizar una llama de poco espesor, circulando a gran velocidad a lo largo de las paredes por calentar.

Pero es fácil darse cuenta que no ocurre exactamente lo mismo en nuestros grandes hornos, en los cuales los espesores de llamas alcanzan varios metros; el calor cambiado por convección permanece sensiblemente constante (proporcional a la superficie lamada por el gas), mientras que el calor radiado crece mucho más de prisa porque

la emisión en una dirección dada aumenta con el espesor de la llama.

Sobre este último punto, nos parece útil el recordar la fórmula simple que fija la cantidad de calor, Q_r , radiada por un cilindro de gas, a temperatura absoluta, T , hacia un elemento unidad de la superficie que rodea este cilindro:

$$Q_r = \epsilon \sigma T^4,$$

en la que: σ , designa la constante de STEFAN, y ϵ es el factor de emisión de la capa gaseosa, es decir, la relación entre la emisión de esta capa y la de una masa perfectamente opaca (cuerpo negro) a la misma temperatura y ocupando el mismo volumen.

Si, por otra parte, suponemos que la pared rodea la llama a una temperatura θ , las cantidades de calor efectivamente captadas por esta pared por convección, Q_c , y por radiación, Q_r , tienen, respectivamente, por expresión (por unidad de superficie de la pared):

$$Q_c = \alpha (T - \theta);$$

$$Q_r = \epsilon \sigma (T^4 - \theta^4),$$

designando por α el coeficiente de convección que se puede, en primera aproximación, admitir constante en todas las temperaturas.

La expresión de la relación $\frac{Q_r}{Q_c}$ de estas dos cantidades,

$$\frac{Q_r}{Q_c} = \frac{\epsilon \sigma (T^4 - \theta^4)}{\alpha (T - \theta)} = \frac{4 \sigma \epsilon}{\alpha} T_m^3,$$

(siendo T_m una temperatura media entre T y θ) muestra que la proporción de energía radiada crece, por una parte, con el factor de emisión ϵ y, por lo tanto, con el espesor de la llama, y ocupa, por otra parte, un lugar tanto más importante cuanto más elevadas sean las temperaturas que intervengan en el horno.

Prácticamente en nuestros hornos a 1.500°C , el calor que se calcula estar transmitido por convección representa apenas un 5% del calor total cedido a las paredes.

Estas consideraciones dan una importancia considerable al estudio de la radiación e incita a tratar de aumentar esta radiación por acción sobre la temperatura y el factor de emisión.

1.4. Cálculo del factor de emisión de una llama de carbón pulverizado

Designemos por d el diámetro de las partículas supuestas esféricas; por ρ su masa específica, y por M_o la masa de sólido en suspensión en la unidad de volumen de gas tomado en las condiciones normales ($\theta_o = 273^\circ \text{ K}$).

A la temperatura θ , la masa contenida en la unidad de volumen es:

$$M_o \times \frac{\theta_o}{\theta}$$

Si consideramos una capa de espesor dx y de sección unidad, encierra un número de partículas igual a:

$$dn = \frac{M_o \frac{\theta_o}{\theta} dx}{\rho \frac{1}{6} \pi d^3} = \frac{M_o \frac{\theta_o}{\theta} dx}{\frac{1}{6} \pi d^3}$$

Por otra parte, la fracción de flujo absorbido,

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = k dx,$$

es igual a la superficie aparente de las dn partículas, o sea:

$$dn \frac{\pi d^2}{4} = k dx = \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{M_o \frac{\theta_o}{\theta} dx}{\frac{1}{6} \pi d^3}$$

$$k = \frac{3}{2} \frac{M_o \frac{\theta_o}{\theta}}{\rho \theta d} = \frac{3}{2} \frac{M_o \times 273}{\rho \theta d} = 410 \frac{M_o}{\rho \theta d}$$

El factor de absorción k es:

$$k = \frac{410 M_o}{\rho \theta d},$$

y el factor total de emisión por un espesor, l , de tal nube de partículas es:

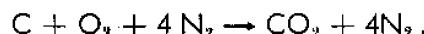
$$\varepsilon_\theta = 1 - e^{-kl} = 1 - e^{-\frac{410 M_o l}{\rho \theta d}}$$

Esta relación muestra que el coeficiente de absorción k y el factor total de emisión ε_θ aumentan cuando el diámetro de las partículas disminuye.

De esta manera, en lo relativo a la radiación hacia las paredes (así como en lo relativo a la rapidez de combustión) es interesante reducir el combustible en polvo tan fino como sea posible.

Calculemos, a título de ejemplo, para unas partículas de carbón ($\rho = 2 \text{ gr/cm}^3$), de diámetro $d = 50 \mu$, los valores de k y ε_θ cuando se ponen estas partículas en suspensión en la cantidad de aire necesaria para la combustión teórica. La mezcla se lleva a 1.900° K y el espesor es de 2 metros.

La ecuación de combustión,



demuestra que 12 gr de carbono están en suspensión en $5 \times 22.400 \text{ cm}^3$ de aire a 0° C .

De lo que se deduce que:

$$M_o = \frac{12}{5 \times 22.400} = 10^{-4}$$

$$k = \frac{410 \times 10^{-4}}{2 \times 1.900 \times 50 \times 10^{-4}} = \frac{410}{190.000} = 2,2 \times 10^{-4}$$

$$kl = 0,44 \text{ y } \varepsilon_{1.900} = 1 - e^{-0,44} = 0,35.$$

Ahora bien, estos factores de emisión así calculados resultan ser considerablemente inferiores a los factores de emisión de las llamas prácticamente medidos. La diferencia se debe en parte, tanto a los hidrocarburos que sometidos al «cracking» producen cierta luminosidad, como a las partículas de cenizas residuales que no se han tenido en cuenta en la fórmula teórica.

Por otra parte hay que notar que la repartición de los granos de combustible no es homogénea y, sobre todo, que todos los granos no encuentran simultáneamente el oxígeno necesario para la combustión. A causa de la difusión progresiva del aire, al principio hay combustible que no puede arder, al final, combustible que termina de arder en el seno de un penacho de gases quemados (formados en parte de CO_2 y H_2O invisibles, pero que tienen una radiación térmica importante y de la que no se ha tenido cuenta en el cálculo del factor de emisión de la llama).

Las desviaciones inmediatamente apre-

ciadas han hecho que unos grupos de investigadores se reúnan para constituir un Comité Internacional para tratar de estudiar experimentalmente la radiación de las llamas, y este es el origen del Centro de Investigaciones de Ijmuiden.

2. RESULTADOS DE LA PRIMERA CAMPAÑA DE ENSAYOS SOBRE CARBÓN PULVERIZADO

(Abril - Mayo, 1956).

2.1. Naturaleza de los ensayos

Son ensayos de carácter industrial. Se propone determinar la influencia de los diferentes parámetros de regulación sobre las características macroscópicas de la llama, es decir, de hecho, las características normalmente empleadas tales como: longitud de la llama, flujo radiado. Con este fin se realizan un gran número de llamas correspondientes a unas condiciones de marcha variadas; cada llama se caracteriza por un número de medidas relativamente restringido; el plan de experiencias y el escrutinio están establecidos por los métodos estáticos.

Está previsto un segundo grupo de ensayos, llamados de mecanismo o científico, que tienen un doble fin:

—Por una parte determinar cuales son, entre la multitud de medidas que se pueden hacer sobre una llama, las que permiten caracterizarla mejor y que merecen, por esto, ser retenidas en los ensayos industriales. Por ejemplo, investigar si la llama posee la simetría de revolución para que sea posible ulteriormente caracterizarla por medidas efectuadas en un solo plano meridiano.

—Por otra parte, unir las dimensiones locales y elementales a las características macroscópicas de la llama. Por ejemplo, unir la radiación total de la llama a las características (composición, dimensión, distribución) del gas y de las partículas que la constituyen; o también, unir los diferentes fenómenos físicos que intervienen en el desarrollo de la llama: fenómenos aerodinámicos de mezcla de los chorros de gas o de partículas, fenómenos químicos de combustión, fenómenos térmicos de emanación

de calor y radiación. En otros términos, se trata de encontrar las leyes elementales de los fenómenos, es decir, unas leyes que permitirán extrapolar los resultados obtenidos a una llama particular cualquiera.

Estos dos objetivos son profundamente distintos, pero las técnicas y las medidas que requieren son, en parte, comunes; esta es la razón por la que pueden ser agrupados. Uno y otro exigen el examen detallado de un pequeño número de llamas, examen en el curso del cual se efectúa un gran número de medidas, tanto en el interior como en el exterior de la llama, con objeto de obtener una descripción tan completa como sea posible.

2.2. Condiciones de ensayos

Los factores siguientes se han mantenido constantes:

Naturaleza del carbón: carbón seco de llama de Lorena (Faulquemont) cuyas características son las siguientes:

- Tanto por ciento de materias volátiles sobre combustible puro: 38,7 %.
- Composición elemental sobre carbón seco: C, 71,4 %; H, 4,5 %; O, 12,7 %; N, 0,9 %; S, 0,9 %; cenizas, 9,6 %.
- Humedad (en el quemador): 3,5 %.
- Índice de hinchamiento Afnor: 0,5.
- Consumo de carbón: 170 kg/hr.
- Aire total: representa un exceso de aire de 10 %.
- Temperatura del aire: 80° C para el aire primario y 400° C para el aire secundario.
- Diámetro del tubo de introducción del aire primario: 100 milímetros.

Se ha estudiado la influencia de los siguientes factores:

1.º) La proporción de aire primario ha sido fijada en 35 % y 75 % del aire teórico necesario. El diámetro de los tubos de introducción del aire primario ha permanecido constante. La velocidad del chorro ha variado paralelamente entre 20 y 43 m/s.

2.º) Para la granulometría del carbón han sido empleadas dos finuras, correspondiendo, respectivamente, a 70 % y 93 %, pasando al tamiz 200 (74 μ).

3.º) Como velocidad del aire secundario se ha utilizado o una velocidad muy pequeña, del orden de 1 a 2 m/s, o una velocidad muy elevada, 70 y 33 m/s (el valor exacto variaba con el gasto, es decir, con las proporciones de aire primario y de aire secundario).

4.º) Para el enfriamiento del horno se ha trabajado, o en cámara caliente, sin ningún tubo de agua, o en cámara fría, introduciendo tubos de agua en toda la extensión del horno, excepto en los dos primeros metros. El flujo de calor cedido por la llama antes de alcanzar la chimenea representaba, en el primer caso, alrededor del 50 %, y en el segundo caso, alrededor del 65 % del calor total introducido en el hogar.

Se han ensayado 16 llamas distintas, correspondientes a todas las combinaciones posibles (dos niveles para cada una de las cuatro variables), y cada una de ellas ha sido examinada dos veces para determinar la precisión de las medidas.

Las medidas efectuadas son las indicadas en el párrafo precedente, pero las medidas interiores a la llama han sido realizadas únicamente sobre el eje del horno.

2.3. Comentario de los resultados

Veamos primeramente como se puede caracterizar una llama determinada. Las medidas efectuadas permiten trazar directamente los cuatro gráficos de las figuras 1, 2, 5 y 6; se refieren a la llama II obtenida en las siguientes condiciones: aire primario, 35 %; granulometría, 70 % < 74 μ ; pequeña velocidad de aire secundario y enfriamiento por tubos de agua.

La figura 1 representa la variación de la composición del gas a lo largo del eje. La figura 2 ilustra la evolución de las partículas sólidas; da, por una parte, la concentración del gas en partículas sólidas (en g/Nm³) y, por otra, los contenidos de carbono y de hidrógeno y el porcentaje de materias volátiles de las partículas, sobre muestra seca.

En la combustión se pueden distinguir varias fases. Al principio, se desprenden materias volátiles, las cuales, encontrando en las cercanías el oxígeno necesario para su combustión, arden a medida que se van

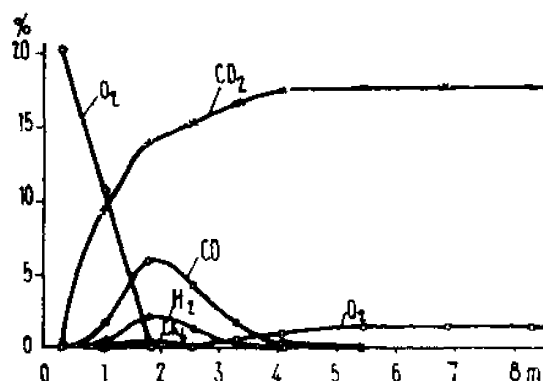


Fig. 1.- Composición del gas sobre el eje.
(Aire primario: 35 %. Finura: 70 % < 74 μ)

desprendiendo; el oxígeno desaparece rápidamente y el contenido en CO₂ se eleva con rapidez. Luego, al disminuir el oxígeno, las materias volátiles no pueden arder completamente y, de aquí, la aparición del hidrógeno y del metano en el gas; el óxido de carbono puede provenir, en parte, de la combustión del metano en presencia de una falta de oxígeno, pero proviene igualmente de la combustión del residuo sólido. Más

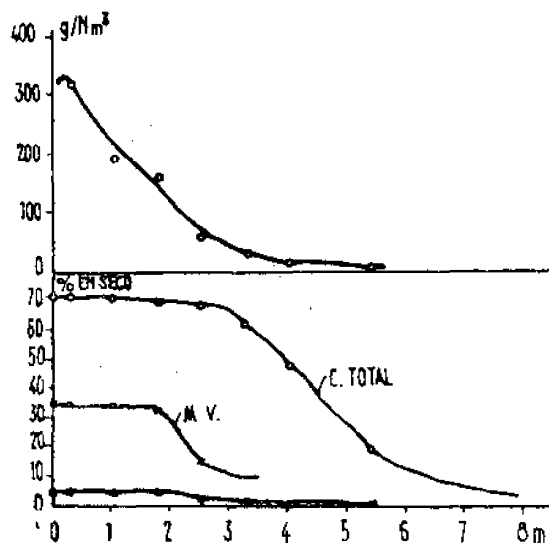


Fig. 2.- Concentración y composición de las partículas sobre el eje.
(Aire primario: 35 %. Finura: 70 % < 74 μ)

tarde, el chorro secundario mezclándose con el primario, lleva oxígeno nuevo al centro de la llama y acaba de quemar las materias volátiles y el óxido de carbono.

La combustión de las materias volátiles exigen un tiempo que no es despreciable. La velocidad de combustión no está limitada, por otra parte, únicamente por la falta de oxígeno, sino también por el hecho de que el calentamiento de las partículas exige un cierto tiempo y que, además, las reacciones de pirólisis del carbón no son instantáneas. Vemos que el porcentaje de materias volátiles del residuo sólido no llega a ser despreciable más que al cabo de algunos metros, lo que corresponde a un espacio de 40 a 50 metros.

La última fase, finalmente, corresponde a la combustión del residuo de cok.

Las figuras 1 y 2 corresponden a una llama para la cual la proporción de aire primario es de 35%, débil proporción para un carbón de llama. Cuando la proporción de aire primario alcanza 75%, el aspecto del fenómeno es sensiblemente diferente. (Está ilustrado por las figuras 3 y 4). Se apre-

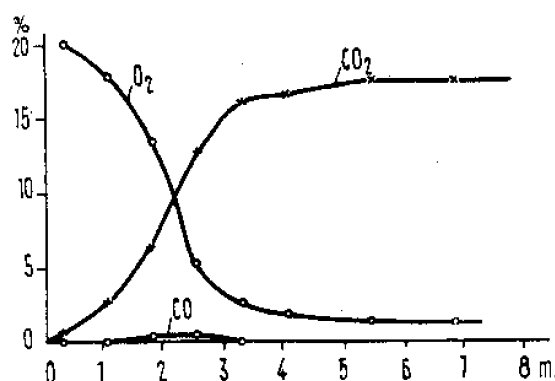


Fig. 3.—Composición del gas sobre el eje.
(Aire primario: 75 %. Finura: 70 % < 74 μ)

cia que las materias volátiles no aparecen en el gas; que deben quemarse a medida que se desprendan. Por lo tanto, la velocidad de combustión de las materias volátiles no está limitada más que por la velocidad con la que se desprenden, siendo esta velocidad, por otra parte, independiente de la

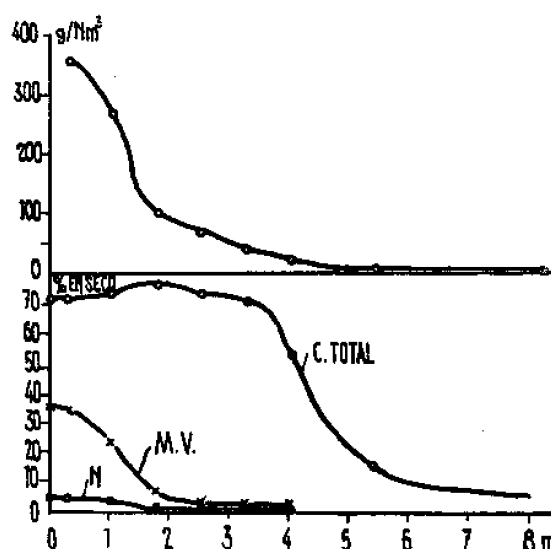


Fig. 4.—Concentración y composición de las partículas sobre el eje.
(Aire primario: 75 %. Finura: 70 % < 74 μ)

proporción de aire primario, como se ha podido verificar. El CO mismo no hace sino una aparición fugaz; si se forma por reacción primaria de combustión, desaparece inmediatamente por combustión a CO_2 en fase gaseosa.

La figura 5 se refiere a la variación de la velocidad de la corriente gaseosa sobre el eje de la llama: la velocidad crece, primero, probablemente a causa del calentamiento rápido del chorro primario y disminuye, luego, regularmente a causa del ensanchamiento del chorro.

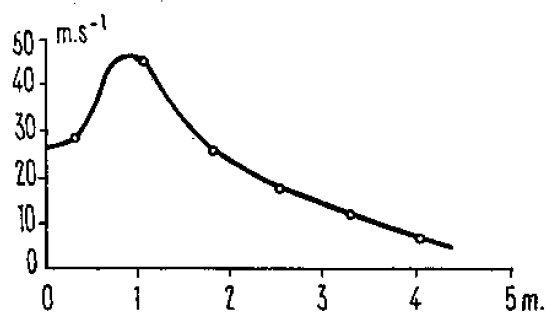


Fig. 5.—Velocidad del gas sobre el eje
(Aire primario: 35 %)

La figura 6 reúne los datos térmicos. Representa, sobre escalas diferentes:

- La temperatura del gas sobre el eje (pirómetro de aspiración).
- El flujo máximo radiado por la llama en la sección recta ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{s}$) (este máximo se observa sensiblemente al nivel del eje de la llama).
- El factor total de emisión de la llama correspondiente a la radiación máxima.

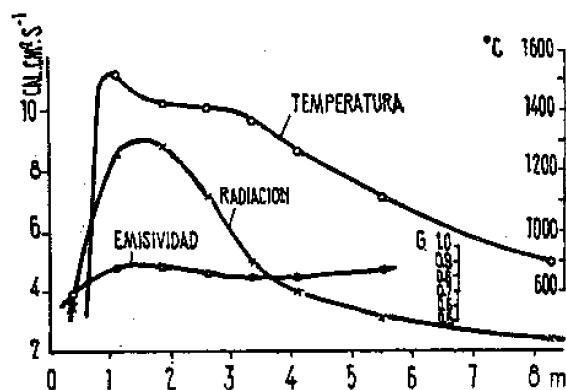


Fig. 6.—Temperatura, radiación máxima y emisividad sobre el eje.

(Aire primario: 35 %. Finura: 70 % < 74 μ)

Se comprueba que la temperatura sobre el eje presenta un valor constante después de un máximo, correspondiente al período en que las materias volátiles no pueden arder inmediatamente a consecuencia de la falta de oxígeno. Esta constancia no aparece cuando la proporción de aire primario es más elevada.

La variación del factor de emisión y del flujo radiado no puede interpretarse únicamente a partir de las curvas precedentes, ya que éstas no conciernen más que al eje de la llama, cuando el flujo radiado y el factor de emisión integran todo lo que pasa sobre el espesor de la llama. Anotaremos solamente:

- Por una parte, el orden de magnitud del factor de emisión ha sido frecuentemente superior a 0,8 y próximo a 1 en algunas llamas.
- Por otra parte, la disminución del flujo radiado a medida que se aleja uno

del quemador no es debida a la disminución del factor de emisión, sino a la disminución de la temperatura. Por lo tanto, parece ser que la combustión del residuo de cok no disminuye considerablemente el factor de emisión de la llama o, por lo menos, que esta disminución sea compensada por la emisividad de los humos.

* * *

Consideremos, ahora, las diferentes llamas correspondientes a los diferentes valores de los cuatro factores estudiados. La influencia de estos diferentes factores puede resumirse como sigue:

1.º) La proporción de aire primario tiene una influencia muy marcada. Ya hemos señalado como actuaba sobre la composición del gas: una proporción elevada de aire primario, se opone a la aparición de las materias volátiles en el gas y reduce mucho el contenido en CO. La longitud de llama necesaria para realizar la combustión (es decir, para reducir el contenido en carbono del residuo sólido en un pequeño valor), por el contrario, no varía mucho; más bien parece crecer ligeramente con la proporción de aire primario, pero este resultado no concierne más que a la combustión sobre el eje de la llama y merecería ser precisado considerando toda la sección.

El efecto más notable es el del flujo radiado. Es mucho más elevado cuando la proporción de aire primario es débil, por lo menos en la primera parte de la llama. La desviación se debe, sobre todo, a una desviación sobre el factor de emisión y puede, sin duda, interpretarse por la formación de hollín resultante de la combustión de las materias volátiles en presencia de un defecto de oxígeno. Este efecto está ilustrado por la figura 7. Se comprueba que la radiación máxima se produce igualmente a una distancia del quemador más corta cuando la proporción de aire primario es más débil, pero esto es a causa de que la velocidad del chorro ha variado al mismo tiempo que la proporción de aire primario, habiendo permanecido constante el diámetro del tubo de acceso del aire primario; si se llevase en abscisas el tiempo en vez de la distancia, se vería que el máximo se produce poco más o menos en el mismo instante.

2.º) Finura del carbón. Como era de esperar, el desprendimiento de las materias volátiles es tanto más rápido y la velocidad de combustión del residuo de cok tanto mayor cuanto más fino sea el carbón. Paralelamente, la temperatura sobre el eje de la llama aumenta más rápidamente, alcanzando un máximo más elevado cuanto más fino sea el carbón.

El efecto sobre la radiación está ilustrado por la figura 7: el flujo radiado es más

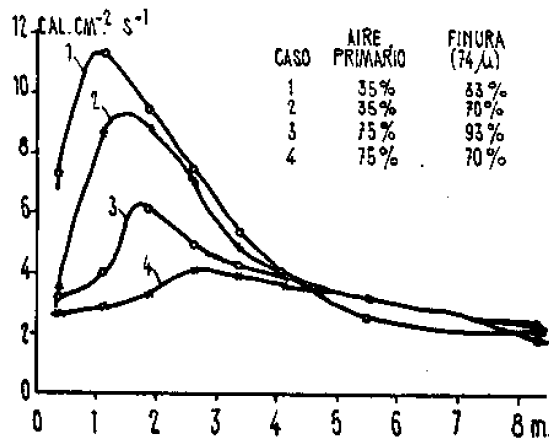


Fig. 7.—Radiación máxima. Interacción.
(Aire primario: Finura)

elevado con el carbón más fino; esta desviación se debe, por una parte, a que el factor de emisión es tanto más grande cuanto más fino sea el carbón, aunque la diferencia entre los factores de emisión no ha sido más que de 4 a 5 % entre las dos granulometrías experimentadas. La diferencia de radiación proviene, sobre todo, de la diferencia de temperatura provocada por la mayor rapidez de combustión cuando el carbón es más fino.

3.º) El enfriamiento del hogar tiene poca influencia sobre el desarrollo de la combustión y, sin embargo, disminuye ligeramente la velocidad de combustión; por otra parte, actúa más sobre la velocidad de desprendimiento de las materias volátiles (velocidad que está determinada, esencialmente, por el flujo de calor recibido por el polvo que penetra en el horno), que sobre la velocidad

de combustión del residuo de cok, lo que está muy de acuerdo con las leyes de la cinética de la combustión.

El enfriamiento del horno disminuye evidentemente mucho la temperatura de la llama, lo que hace menor el flujo radiado por la misma.

4.º) Velocidad del aire secundario. No se ha podido poner en evidencia ninguna influencia significativa de este factor, por lo menos en las condiciones en que se ha operado; esto se debe, al parecer, a que la cantidad de movimiento del chorro primario ha sido siempre importante, de manera que la velocidad con la que se mezclan los dos chorros depende poco de la velocidad del chorro secundario.

2.4. Crítica de estos resultados

Uno de los resultados importantes expuestos más arriba es que, por el juego del aire primario y de las materias volátiles del combustible, a materias volátiles constantes, el flujo radiado aumenta considerablemente cuando la cantidad de aire primario disminuye.

Ahora bien, las medidas que hemos logrado hacer sobre el horno de cemento han puesto de manifiesto el mismo fenómeno.

Este es un resultado notable puesto que, y esto de una manera constante en el curso de numerosas series de ensayos, al mismo tiempo que disminuye el aire primario y aumenta la energía radiada, disminuye la producción del horno o, dicho de otro modo, el calor transferido a la materia por la llama.

Este resultado evidentemente paradójico no es el único; sabemos que se han hecho análogas observaciones sobre el horno Martín.

Si está en contradicción con nuestras ideas actuales, no hay por qué desanimarse, puede estar, por el contrario, en el manantial de estudios cuyas consecuencias serán importantes para la utilización más racional de nuestros combustibles clásicos.

Este resultado demuestra que en la transmisión de calor de una llama a una materia intervienen otras características, aparte de la radiación y la convección.

3. UNA NUEVA ORIENTACION DEL ESTUDIO DE LA TRANSMISION DE CALOR DE LAS LLAMAS

Voy a describir algunas experiencias significativas que muestran que, desde que una llama roza una materia, los coeficientes de intercambio aumentan en proporciones considerables.

Coloco un quemador de propano y de aire comprimido, enfrente de un ladrillo aislante biselado.

En la figura 8 se ve una llama pasando

minosa o transparente desplazando un cono que equipa la parte delantera del quemador.

Van a ser descritos dos grupos de experiencias: con llama transparente y con llama luminosa.

3.1. Resultados obtenidos con una llama transparente

1) Emisión de la llama (no luminosa) según el pirómetro: 15.000 kcal por hora y por m².

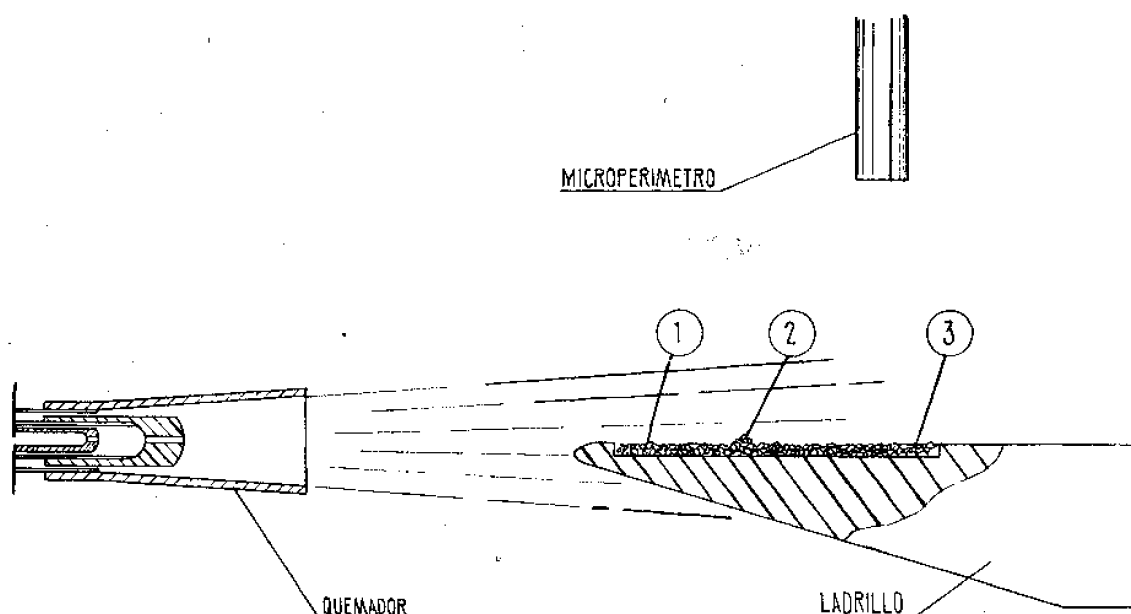


Figura 8

sobre el ladrillo que está un poco hundido en la parte superior de una cavidad donde se encuentra la materia que hay que calentar, que es el clínker de cemento. Un pirómetro colocado verticalmente permite medir:

a) Sin ladrillo, la radiación total producida por la llama sola.

b) Con ladrillo, la radiación producida por la llama y la materia calentada.

Las cantidades de propano y de aire admitidas se conocen por dos contadores volumétricos. La llama se puede volver lu-

2) Emisión de la llama y de la materia: 78.000 kcal por hora y por m².

3) Temperatura tomada por el termopar en la llama: 1.450°C.

4) Temperatura en la superficie de la materia: 1.000°C.

La temperatura media de la materia es de 860°C: los granos que emergen están a una temperatura netamente más elevada, del orden de 1.000°C, mientras que las partes profundas están a 800°C. Estas partes,

así como las emergentes sometidas al roce, reciben una energía considerable. La experiencia siguiente lo precisa.

Un gránulo de materia de 6 mm está atravesado de parte a parte y la soldadura de un par de platino-radio de 0,25 mm situada en su centro.

El grano de materia está sucesivamente colocado en las posiciones ①, ②, ③, y las temperaturas observadas son de 960°, 920° y 820°C (fig. 8).

En la posición ③, se ha dispuesto una pequeña rampa delante del grano de materia con el fin de que la llama no roce más que su parte superior; su temperatura decae a 676°C. Alzando la pequeña rampa en cuanto cese de producirse el roce, la temperatura baja a 520°C.

Formulando el equilibrio térmico de la superficie de la materia bajo el efecto de la radiación y de la convección, despreciando las pérdidas a través del ladrillo, y admitiendo una temperatura aproximada de la llama de 1.700°C, se ve que el coeficiente de convección es del orden de 100 kcal.h⁻¹. m⁻². °C⁻¹ para una velocidad de la llama de 1,5 metros por segundo. Valor muy superior a lo que da el cálculo clásico del coeficiente de convección.

3.2. Resultados obtenidos con una llama luminosa (siempre con el mismo gasto de calor).

El pirómetro dirigido hacia la llama en ausencia del ladrillo indica un aumento de emisión de 35 a 40 %, mientras que el termopar que está en la llama, señala una disminución de temperatura de 150°C; pero la radiación total de la llama y de la materia calentada por ella, baja alrededor de 80 %; para saber como ha variado la temperatura de la superficie de la materia, según esta medida de radiación, sería necesario conocer el factor de absorción de la llama para la radiación de la materia. No lo hemos determinado; pero colocando un par en el sitio de un elemento de materia se halla una temperatura mucho más baja que con la llama no luminosa, del orden de 600°C. Esto pone de manifiesto, de una manera muy clara, que el importante medio de transmisión de la llama no es tanto la radiación

clásica o la convección muerta, sino otro proceso que el profesor Veron llama «convección viva».

Volviendo al horno de cemento, se puede imaginar, ahora, por qué el gasto disminuye cuando el aire primario disminuye. Aunque la llama se vuelva luminosa, «la actividad de combustión» decrece y la energía aportada por roce disminuye. Por otra parte, la materia tiene una tendencia natural a defenderse contra la aportación de calor que se le hace; casi inmóvil es llevada a la superficie a una temperatura que tiende a ponerse en equilibrio con la temperatura de la masa radiante gaseosa que le hace frente. Se defiende contra la aportación de calor. El medio que toma la convección viva, es aportar, al contacto de la masa a calentar, «energía inmediata».

Como conclusión diremos que es muy importante librarse de las ideas clásicas que presenta la radiación o la convección, y ver un poco más lejos, sino no se llegará nunca a salir de los dilemas en los que nos encierra la experiencia.

4. INFLUENCIA DEL POLVO SOBRE LA TRANSMISIÓN DEL CALOR EN EL HORNO DE CEMENTO

4.1. Determinación de la calidad de transmisión del calor

Nuestra experiencia de los múltiples hornos de cemento nos ha llevado a la convicción de que la transmisión de calor es tanto peor cuanto más importante es la cantidad de polvo.

Más allá de la llama, que no ocupa apenas más que el 1/5 de la longitud del horno de cemento, se extiende la oleada de gases quemados que, conteniendo CO₂ y H₂O, son, por sí mismos, emisivos, pero, además, contienen polvo que aumenta todavía más este factor de emisión.

4.2. Manifestación del papel del polvo

Se han hecho experiencias en una sección de un horno (cuya producción en relación con su longitud y a diámetro era de

las más elevadas) donde todo el combustible había sido quemado y no había llama, sino solamente una oleada de gases quemados.

Se conoce así la composición de los gases (teniendo en cuenta el gas carbónico que desprende la materia prima) y, según las presiones parciales del gas carbónico y del vapor de agua, se pueden calcular con ayuda de las tablas, preparadas para la radiación de los gases, el factor de emisión de la masa gaseosa.

Se encuentra así un valor de 0,26.

Ahora bien, el factor de emisión medido simultáneamente es del orden de 0,9. Esta diferencia se relaciona con la radiación del polvo como veremos.

Dejando girar el horno, se corta la llegada del carbón. Ciertamente, el régimen aerodinámico en el horno cambia, puesto que la corriente gaseosa, de un peso sensiblemente igual, no se calienta ya por la llama y, por lo tanto, es menos rápida. Simultáneamente la cantidad de polvo desarrollada por el horno, que es por esta razón menor, es también mucho menos caliente. Se hacen, sin embargo, las siguientes comprobaciones que dan unos resultados cualitativos interesantes.

La emisión de carbón cortado decae a 70 % de su valor inicial y se para la rotación a 40 %.

En resumen, si se tiene en cuenta que los valores obtenidos son inferiores a los valores reales a causa de la perturbación introducida por la interrupción de inyección del carbón, se aprecia que la radiación del polvo es considerable y muy superior a la radiación térmica gaseosa. La radiación total no es la suma algebraica de las dos, ya que hay absorción parcial de una por la otra.

El hecho esencial en la radiación de la llama y de los gases quemados en un horno de cemento, es, seguramente, el papel importante realizado por el polvo en la emisión. El factor de emisión muy elevado resultante de la presencia de polvo en la corriente gaseosa, condiciona estrechamente la transmisión de calor a la pared y a la materia.

4.3. Emisión debida al polvo solo

El cálculo que hemos expuesto para determinar el factor de emisión de la suspensión de carbón pulverizado, también se aplica aquí y con unas notaciones análogas; se puede escribir:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kl}$$

siendo l el espesor de la llama y k su coeficiente de absorción.

Si se hace un cuadro del valor del producto kl ; del factor de emisión $1 - e^{-kl}$; y de la transmisión de calor de la masa, suponiendo que no hay movimiento transversal, se encuentran los siguientes valores:

kl	0,2	0,4	0,8	1,2	1,4	2	5	10
$1 - e^{-kl}$	0,18	0,33	0,55	0,70	0,75	0,87	0,99	1,00
transmisión	0,33	0,54	0,76	0,82	0,83	0,80	0,54	0,16
						máx		

Se ve que la radiación no aumenta constantemente con la opacidad, sino que, a partir de un cierto valor, el calor transmitido tiende a decrecer, las capas exteriores son muy absorbentes, forman una pantalla e impiden a las capas centrales perder su calor.

Es muy probable que la determinación de k por el cálculo sea imposible desconociendo como se desconocen la granulometría y la cantidad de polvo existente en el flujo gaseoso, ya que kl es, en la mayoría de los hornos de cemento, igual a 1. En el horno considerado éste debía de ser su valor. Pero a partir del crecimiento de este valor, la transmisión de calor puede decrecer rápidamente.

Esto explica el poco éxito de los dispositivos transmisores, ladrillos reelevadores y otros que aumentan la cantidad de polvo producido.

Además de los inconvenientes evidentes que están ligados a las fuertes producciones de polvo, estoy convencido de que todos los esfuerzos que nosotros, cementeros, hagamos para reducir al mínimo la circulación de polvo en nuestros hornos, son fundamentales.